スプリンクラ配管の静的加力実験

建築の非構造部材・建築設備の耐震補強と改修に関する研究(その1)

THE STATIC LOADING TESTS OF SPRINKLER PIPING

A study on seismic retrofit and renovation of building equipment and non-structural elements (Part1)

志津えりか — * 1 大橋一正 ——— * 2
西川豊宏 ——— * 3 山下哲郎 ——— * 4
増田真也 ——— * 1

Erika SHIZU ——— * 1 Kazumasa OHASHI — * 2
Toyohiro NISHIKAWA — * 3 Tetsuo YAMASHITA — * 4
Shinya MASUDA ——— * 1

キーワード:
建築設備, スプリンクラ, 非構造部材, 静的加力実験, 耐震性能

Keywords:
Building equipment, Sprinkler, Non-structural elements, Static loading tests, Seismic performance

A series of experimental study to investigate the bending strength and flexibility of steel sprinkler pipe through static loading tests, are carried out. These pipe systems don't adopt flexible joints. To investigate the aging effect, aged pipes are tested and compared with new pipes. Moreover, to specify the service limit is lost due to leakage of water, the pipes subjected to load are filled with compressed air, and the air pressure is also measured together with the load and deformation. Based on the above experimental study, a simple way to approximate the failure deformation and load is proposed.

1. はじめに

近年、スプリンクラ(以降 SP)設備の配管とヘッドは、室内のレイアウト変更への追従性や耐震性向上のため可とう性継手を用いて接続されるケースが一般的となったが、築20年を経過した既存建物では、当該部分(以降 巻き出し配管)において可とう性継手の使用事例が少ない。また、地震による建築構造躯体の損傷が少ない場合でも、大きな応答加速度により家具転倒はもとより天井や間仕切り壁等の非構造部材と、それに接続されている建築設備の崩落や損傷がこれまでの大規模地震において多く報告されている。その中でも可とう性継手を用いていないSP設備における被害は極めて多く、SP配管やヘッドの損傷に伴う漏水により二次被害が生じる。また、天井材崩落による散水障害の発生等が指摘されていることもあり、その耐震補強あるいは改修方法の具体策が必要とされている。

2. 過去の被害事例及び既往研究調査

建築設備に係る過去の地震被害調査^{1), 2)}によると、図1に示す通り空調設備が約35[%]、給水設備が約22[%]、電気・通信設備が約10[%]、排水設備が約8[%]につぎ、消火設備は約7[%]程度ではあるが、図2に示す通り消火設備におけるSP設備の被害割合は配管が約36[%]、ヘッドが約32[%]となっており、SP設備系統の中でも末端部分での被害が大半を占めている。表1にSP設備の被害内容と原因を示す。それによると天井部分における非構造部材と配管の振動性状の違いによる配管継手部での損傷・漏水や、ヘッドと天井材あるいは防火戸等の建築部材との衝突による誤作動が多く、大半が二次被害として室内に影響を及ぼしていると報告されている。

一方、既往の研究・調査では、配管ねじそのものの強度と折損挙動を実験的に評価した亀井⁴⁾の報告、システム天井における耐震上

図1 建築設備の被害割合¹⁾

図2 SP設備の被害割合²⁾

表1 SP設備の被害内容と原因³⁾

	被害内容と原因
配管	・天井材とSP配管の振動性状の違いによる天井材の破損 ・天井内に設置されている他の建築設備との衝突 ・エキステンションジョイント部における建築設備との振動性状の違い(可とう性継手配管も損傷した) ・固定支持材の破損による配管の揺れ ・固定機器・配管との振動性状の違い
ヘッド	・エキステンションジョイント部における建築設備との振動性状の違い ・天井材との衝突による感熱部の脱落 ・天井材の落下に伴う散水障害 ・間仕切り壁等の転倒に伴うヘッドとの衝突 ・防火戸との衝突による感熱部の脱落

¹⁾ 工学院大学 大学院生
(〒163-8677 新宿区西新宿1-24-2)

²⁾ 工学院大学 名誉教授・博士(工学)

³⁾ 工学院大学建築学部まちづくり学科 准教授・博士(工学)

⁴⁾ 工学院大学建築学部建築学科 准教授・博士(工学)

¹⁾ Graduate Student, Kogakuin Univ.

²⁾ Prof. Emer., Kogakuin Univ., Dr. Eng.

³⁾ Assoc. Prof., Dept. of Urban Design and Planning, Kogakuin Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Kogakuin Univ., Dr. Eng.

の力学的性状を静的水平荷重試験により検討した荻原ら⁵⁾の研究や SP 配管を含む天井ユニットを再現し加振実験から損傷特性や変位量等を実験した菊地原・水谷ら^{6),7)}の研究があるが、地震動による非構造部材と建築設備の総合的な振動特性や損傷性状を定量的に評価した研究事例は少ない。

本研究では、SP 巻き出し配管に可とう性継手を有していない既存建物の SP 設備を対象に破断強度を調査し、地震防災対策を提言すべく、静的加力実験を行い非構造部材と建築設備の耐震補強と改修方法について検討するものである。本報告文においては、SP 巻き出し配管の在来工法を想定した静的加力実験を行い、配管の荷重、変位量の測定を行ったため、それらの結果について報告する。

3. 実験の手順と評価方法

3.1. 実験の手順

図 3 に本研究の実験手順と評価方法を示す。実験の評価対象としては天井等の非構造部材とそれに組み込まれた各種建築設備である。建築設備の機器類として配水管、各種機器・器具、配線類が挙げられる。その中の配水管については、システム天井に可とう性継手を用いて SP ヘッドに接続する場合とねじ込みにより接続する場合とに分類される。過去の被害事例によると建築設備に接続する配管の継手部、あるいは異なる口径との接続部での破断が報告されているため、巻き出し配管を対象に脆弱部分である配管継手部における耐震性能の検証を目的に、静的加力実験を行った。この実験で得られた結果からモーメント及び変位角を算出する。

更に、振動台による水平加力実験では、静的加力実験と同様に荷重及び変位量を測定すると共に、静的加力実験によって求めたモーメント及び変位角がどの程度の振動が起こった場合に発生するか検証をする予定である。これら 2 つの実験にて得られた結果を分析し、耐震性能評価として地震防災対策における耐震補強と改修方法を計画・立案する。

3.2. 評価に用いた測定値と算出式

本実験において測定した荷重・変位量を評価するため、モーメント及び変位角を以下の算出式により求める。また、算出に用いた配管継手の各部位を図 4 に示す。モーメントの算出は、式(1)にて測定値から求めた弾性モーメント M_u^{ex} (以降 測定弾性モーメント)を、式(2)にて破断モーメント M_u^{es} (以降 測定破断モーメント)を算出し、式(3)⁴⁾、(4)⁸⁾にて図 4 に示す JIS 規格の値に基づき推定したモーメント M_u^{es} (以降 推定破断モーメント)を算出した。なお、推定破断モーメントは、理論上最も力が加わり破断する危険性が高いメイン配管からの巻き出し配管への分岐点を破断部と想定した。

また、変位角については、式(5)にて試験体毎の変位角を算出し、配管の弾性限界及び破断限界について評価した。

$$M_u^{ex} = P_u \cdot L_1 \tag{1}$$

$$M_e^{ex} = P_e \cdot L_1 \tag{2}$$

M_u^{ex} :測定破断モーメント M_e^{ex} :測定弾性モーメント

P_u :破断荷重 P_e :弾性荷重

L_1 :巻き出し配管の立下り部(表 2 参照)

$$M_u^{es} = \sigma_u \cdot Z_p \tag{3}$$

M_u^{es} :推定破断モーメント

σ_u :ねじ切り部の引張り強度(=290[N/mm²]) (JIS G 3452)

Z_p :ねじ切り部の全塑性係数

$$Z_p = 4R_m^2 \cdot t \tag{4}$$

R_m :肉厚中央部の半径=(d-d₀)/2=15.4

t :ねじ切り部の肉厚=d₀-h=1.721

$$\text{変位角[rad]} = \frac{\alpha}{L_1} \tag{5}$$

α :変位量

L_1 :巻き出し配管の立下り部(表 2 参照)

※太線は本報告の研究範囲を示す。

図 3 本研究の実験手順と評価方法

図 4 推定破断モーメント算出に用いるニップルねじ部の断面概略図

4.1. 実験装置・測定概要

試験体に充填した圧力の変動は、圧力センサを用いて測定し、実験時に圧力の低下傾向を視視確認するためアンプを用いて測定値を表示した。圧力センサは、測定範囲の異なる２種類の圧力センサ A(測定範囲:0～1.2[MPa])，B(測定範囲:0～0.5[MPa])を用い、他の測定器と同様 1 秒間隔で測定値を記録した。

表 2 に試験体寸法及び実験回数を示す。本実験に用いた試験体は、築 20 年以上の既存建物における SP 巻き出し配管で多く用いられている、管用テーパードねじ (JIS B 0203: 外径 33.3 [mm], 内径 30.3 [mm]) に加工された配管用炭素鋼管の白管 25 [A] (JIS G 3452: 外径 34.0 [mm], 内径 27.6 [mm]) である。

試験体 a～g を用いた実験は、配管の破断強度及び破断に至る挙動を調査する基礎実験である。また、試験体①～⑨を用いた実験は、実際の施工状況を再現した形状で、強度及び破断傾向を調査する実験である。試験体を使用する配管は、既存建物^{注 2)}において実際に 40 年間使用した配管^{注 3)} (以降 経年試験体)と、経年試験体と同形状の新しい配管 (以降 新品試験体) の 2 種類を用いて、各試験体について新品試験体は基礎実験 3 体、巻き出し配管の実験 2 体、経年試験体は 1 体を用いた。なお、経年試験体が実際に施工されていた状態を再現するため、配管接続部に液状シーラ材を用い、ねじ継手部の気密性を確保した。

図5 地震によりSPヘッド及び配管に加わる応答加速度

図6 実験装置と測定概要

表2 試験体寸法及び実験回数

	試験体	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	新品〔体〕	経年〔体〕	
基礎実験	a	240	－	－	－	3	1	
	b	270	－	－	－			
	c	275	－	－	－			
	d	315	－	－	－			
	e	400	－	－	－			
	f	480	－	－	－			
	g	770	－	－	－			
巻き出し配管の実験	①	355	400	80	275	2		1
	②	385	440	90	295			
	③	425	460	90	335			
	④	850	240	80	770			
	⑤	365	515	80	285			
	⑥	425	480	90	335			
	⑦	395	600	80	315			
	⑧	420	255	120	300			
⑨	455	270	120	335				
基礎実験 (a～g)				巻き出し配管の実験 (①～⑨)

单位[mm]

4.3. 予備実験

本実験には、前節 4.2. 表 2 における試験体番号②を用いて実験を行った。

静的加力実験の実施に際しては、ねじ込み深さの違いより破断モーメントに違いが生じると考えられた。そこで、ねじ込み深さによる影響を評価するため、配管からの漏気がない最小のねじ込み深さと更にねじを 1 回転締めこんだ条件で試験体を取り付け実験(以降予備実験)を行った。ねじ込み深さは試験体番号 1～5 においては前節 4.1. 図 5 の支点に接続されるねじ部を 8 回転(以降 ねじ込み 8 回転)、試験体番号 6～9 では 7 回転(以降 ねじ込み 7 回転)とし、計 9 回実験を実施した。

図 7 に予備実験による破断荷重及び変位量を示す。ねじ込み 7 回転に設定した場合、破断荷重 2.93～3.58[kN]であり、ねじ込み 8 回転に設定した場合 3.57～3.82[kN]であった。ねじ込み 8 回転に比べ、ねじ込み 7 回転では低い値で破断しており、ねじ込み深さの違いが破断荷重に影響を与えることを確認できた。また、変位量はねじ込み 8 回転、ねじ込み 7 回転共に 40～60[mm]であり、幾分ばらつきはあるが、明確な差異は確認できなかった。

5. 実験結果

5.1. 試験体配管の破断結果

図 8 に試験体の破断箇所を示す。配管が継手部にねじ込まれている部分は配管と継手部のねじがかみ合い、有効断面が他の部分より大きいことから強度が高い。破断箇所は有効断面が小さく、大きな応力が生じるため、試験体の破断箇所は、全て配管余ねじ部の最も継手に近いねじの谷部であった。また、図 8 より破断箇所は (i) ～(iv) で発生した。最大モーメントがかかる (i) での破断が大半であったが、ねじ内部は応力状態が複雑であり、かつ経年試験体の劣化状態あるいは施工誤差(ねじ込み深さの違い)の影響もあって、稀に (ii) ～(iv) でも破断したと考えられる。破断の状態は各実験で共通して図 8 中の写真に示すようにねじの谷部の折損が 1 箇所に限定し、亀裂が発生しており、これまでの地震被害³⁾に見られた配管損傷に近い状況となった。

5.2. 実験における荷重・変位関係と配管内圧力

図 9 に、SP 配管への荷重・変位量関係を示す。グラフより 2 つの折れ点を確認できる。第一折れ点が弾性限界^{注 4)}となる点であり、第二折れ点が破断限界となる点である。SP 配管の耐力特性は、これら 2 つの荷重・変位を測定することにより評価する。

試験体は、弾性限界を越えた後も非常に大きな塑性変形をしており、配管材の粘り強さが確認できる。その状況を撮影したのが写真 1 である。

図 10 は測定開始から破断までの荷重と配管内圧力を時系列変化で示したものである。配管内圧力は、破断限界まで低下が見られず、破断限界を超えると急激に低下する。これより、配管は弾性限界を超え変形するが、破断点に達するまでは、漏気が無く SP 設備の機能は維持されていた。

5.3. 測定データと破断モーメント・変位角の算出

図 11 に試験体毎の弾性荷重及び破断荷重、図 12 に変位量を示す。試験体形状の違いや配管接続部での微細な施工誤差(ねじ込み深さの違い)や材料強度の影響により、測定データは幾分ばらつく。以降、

前節 3.2 にて示した算出式を用いてモーメント及び変位角を算出する。

図 7 予備実験結果

図 8 試験体の破断箇所

図 9 荷重・変位関係(試験体⑦の場合)

写真 1 実験前後の試験体の形状比較

図 13 に測定弾性モーメント, 及び推定破断モーメントの算出結果を示す。

基礎実験において測定弾性モーメントは約 800~1,000[kN・mm]であり, 測定破断モーメントは約 1,200~1,400[kN・mm]であった。一方, 巻き出し配管においては測定弾性モーメントが約 600~800[kN・mm]の範囲内であり, 測定破断モーメントは概ね, 基礎実験と同様な約 1,200~1,400[kN・mm]の範囲内であった。

新品試験体に比べ経年試験体は概ね低い値となったが, 全体的にばらつきが見られた。その原因の一つとして, 予備実験において確認した施工誤差(ねじ込み深さの違い)の影響が考えられる。

しかしながら, 測定弾性モーメント及び測定破断モーメントは, 算定された推定破断モーメントである約 481[kN・mm]を大幅に上回る値であった。本報告に用いた推定破断モーメントは既往研究⁴⁾を参考にしたが, 推定破断モーメントと測定破断モーメントの大きな差の原因については今後の調査課題である。

図 14 に各試験体の弾性限界と塑性限界における変位角を示す。基礎実験において, 弾性変位角は約 0.01~0.02[rad], 破断変位角は約 0.04~0.06[rad]であった。一方, 巻き出し配管においては, 弾性変位角は約 0.03~0.04[rad], 破断変位角は約 0.11~0.14[rad]の範囲であった。

図 10 測定時の荷重と配管内圧力の変化(試験体⑦の場合)

※凡例は図 11 に従う。

図 12 実験結果(変位量)

※凡例は図 11 に従う。

図 13 実験結果(破断部のモーメント)

＜凡例＞

- : 新品試験体弾性限界(平均値) ○: 新品試験体破断限界(平均値)
- ×: 経年試験体弾性限界 ×: 経年試験体破断限界

図 11 実験結果(荷重量)

※凡例は図 11 に従う。

図 14 実験結果(変位角)

経年試験体と新品試験体の結果を比較すると、弾性限界、破断限界ともに変位角に大きな差は確認されなかった。巻き出し配管においては、試験体①と④の値に大きな差があったが、これは配管の材料特性、試験体の形状や配管の施工状態によるものと考えられる。

基礎実験と巻き出し配管の変位角を比較すると、巻き出し配管の破断限界時の変位角は基礎実験の約2倍であった。これは、巻き出し配管の継手ねじ部が単管に比べ多いため、ねじ部の変形による曲げが生じたと考えられる。

上記の実験結果を用いて、例えば図15に示す巻き出し配管の破断時の推定破断モーメントと変位量を推定する。図13に示す測定破断モーメントが最低となった試験体番号④の値 $986[\text{kN}\cdot\text{mm}]$ を巻き出し配管の立下り寸法 $700[\text{mm}]$ で除すと、破断荷重約 $1.4[\text{kN}]$ 、図14に示す破断変位角の最小となった試験体⑧の値 $0.08[\text{rad}]$ を立下り寸法 $700[\text{mm}]$ で乗じると破断時の変位量 $56[\text{mm}]$ が算出され、巻き出し配管の立下り寸法から SP 配管破断時の荷重と変位量の目安を推定できる。^{注5)}

図15 立下り寸法と荷重・変位関係の一例

6. まとめ

本報では、既存建物に使用事例が多い可とう性継手を用いていないSP配管を評価の対象とし、静的加力実験で破断にいたる挙動の調査及び破断強度を求め、以下の知見を得た。

- ・試験体の破断部は、全て配管余ねじ部の、最も継手に近いねじの谷部で発生した。
- ・配管は、破断点に達するまでは漏気が無く塑性域においても、SP設備の機能は維持されている。
- ・算定された推定破断モーメントは約 $481[\text{kN}\cdot\text{mm}]$ であり、測定破断モーメント及び測定弾性モーメントを大きく下回る結果となったが、実験に使用した試験体の引張り強さとの関係は今後の検討課題である。

今後は、経年試験体の特性把握、配管材や継手仕様を変更しての水平加力実験を行い実験精度の向上とデータ蓄積を継続すると共に、振動台を用いた水平加力実験により、非構造部材と各種建築設備に生じる振動特性を調査する予定である。

謝辞

本研究は、工学院大学都市減災研究センター(UDM)の活動の一環として行った。(有)タナカ建築設備の田中孝様並びに斎久工業㈱の堀之内淳様、鳥越英毅様、高部進様、並びに工学院大学の久田嘉章教授、久保智弘特任助教には、実験にて御協力を頂き、小林光男教授には

貴重な御助言を頂いた。

また、本研究は当時工学院大学大学院生の藤村竜馬(現 ㈱ジェイアール東日本建築設計事務所)、当時工学院大学卒論生の稲垣舞(現 清水建設㈱)、田中悠紀人(現 ㈱テクノ菱和)、並びに、西川研究室 現 卒論生の江藏由也、古上祐弥、森美沙子らの協力による。

参考文献

- 1) 日本損害保険協会：消火設備の地震時の信頼性に関する調査・研究報告書、pp. 24-25, 1995. 3
- 2) 日本消防設備安全センター：消防用設備等耐震性調査研究報告書、p. 25, 1996. 5
- 3) 大阪市消防局：兵庫県南部地震における消防用設備等の被害調査報告書、p. 13, pp. 32-38, 1995. 4
- 4) 亀井浅道：ガス配管ネジ継手部の曲げ強度、消防研究所報告 第55号、pp. 47-52, 1983. 3
- 5) 荻原健二、星川努 他：金属パネル天井の耐震性に関する研究(その1~3)、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 215-220, 2007
- 6) 菊地原雅則、水谷国男 他：地震時のスプリンクラー設備の挙動とその損傷に関する研究(その1)、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 1471-1474, 2009. 9
- 7) 菊地原雅則、水谷国男 他：地震時のスプリンクラー設備の挙動とその損傷に関する研究(その2)、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 995-998, 2010. 9
- 8) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針、p. 35, 2010. 5

注

- 1) 湿式のSP設備は実際、配管内に加圧水が充填されているが、本実験においては既往研究における実験方法を参考に加圧空気を充填、加力に伴う配管の損傷は管内圧力の低下をもって判断する。配管内空気の加圧条件は、安全面を考慮し、既往研究と同様に $0.3[\text{MPa}]$ とした。
- 2) 東京都千代田区大手町に位置する1970年に竣工したオフィスビルである。SP設備は湿式配管で発報履歴は無く、2009年の改修工事に至る40年間存置されていた。
- 3) 調達した経年試験体は、ねじ切り部に多少錆を確認したが、際立った劣化は確認されなかった。また、運搬の関係上各継手部で一度解体したが、実験組み直し時には解体前と同等のねじ込み量(ねじ込み7回転から8回転)で配管施工した。
- 4) 弾性限界点は、荷重・変位(Y)のグラフにおいて、傾きが変化する点を定義とする。本実験においては、負荷速度が遅くグラフの傾きが明確でなかったことを考慮し、弾性限界点は目視での判断とした。
- 5) 本推定は実験結果を用いてSP配管の破断時の荷重と変位量に関する考察を試みたものであり、更なる実験データの蓄積を要すると考えられる。

[2011年6月20日原稿受理 2011年8月31日採用決定]